



EVALUER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE AIRE URBAINE LITTORALE: OUTILS D'AIDE A LA REFLEXION ET D'AIDE A LA DECISION EXISTANTS

Christine Voiron, Nathalie Dubus, Jean-Christophe Loubier, Sophie Liziard

► To cite this version:

Christine Voiron, Nathalie Dubus, Jean-Christophe Loubier, Sophie Liziard. EVALUER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE AIRE URBAINE LITTORALE: OUTILS D'AIDE A LA REFLEXION ET D'AIDE A LA DECISION EXISTANTS. 5th Urban Research Symposium Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda, Jun 2009, Marseille, France. pp.1-24. halshs-00470199

HAL Id: halshs-00470199

<https://shs.hal.science/halshs-00470199>

Submitted on 4 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EVALUER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE AIRE URBAINE LITTORALE : OUTILS D'AIDE A LA REFLEXION ET D'AIDE A LA DECISION EXISTANTS

Christine Voiron-Canicio
Professeur de Géographie
Université de Nice Sophia Antipolis/CNRS - UMR ESPACE
Christine.Voiron@unice.fr

Nathalie Dubus
Maître de conférences en Géographie
Université de Grenoble 1/CNRS - UMR ESPACE
Nathalie.Dubus@ujf-grenoble.fr

Jean-Christophe Loubier
Chargé de recherche et d'enseignement
IGAR Université de Lausanne, MAPS Université de Neuchâtel
Jean-Christophe.Loubier@unine.ch

Sophie Liziard
Doctorante en Géographie
Université de Nice Sophia Antipolis/CNRS - UMR ESPACE
Sophie.Liziard@unice.fr

Summary:

Aux dires des experts du GIEC, le pourtour méditerranéen devrait être, au cours de ce siècle, « un hot spot du changement climatique ». Mais si les répercussions de ce changement sont estimées dans leurs grandes lignes par les Global Climate Models, les effets locaux sur un territoire donné restent très mal connus. Cette communication présente une démarche d'analyse des impacts du changement climatique sur le fonctionnement de systèmes urbains, en contexte imprécis et incertain. La méthode utilisée relève de la modélisation conceptuelle systémique, le terrain d'application est celui de la région urbaine Niçoise. Le transfert de la connaissance experte des scientifiques aux différents acteurs du territoire est ensuite appréhendé à travers le développement de deux outils, un système à base de connaissances et un générateur de maquettes virtuelles du territoire, qui permettent de favoriser la réflexion et la décision par le biais de la simulation.

Key Words: Impacts du changement climatique, modélisation systémique, région urbaine niçoise, transfert de la connaissance, système à base de connaissances, maquette virtuelle du territoire, simulations, aide à la réflexion, aide à la décision.

EVALUER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE AIRE URBAINE LITTORALE : OUTILS D'AIDE A LA REFLEXION ET D'AIDE A LA DECISION EXISTANTS

I. INTRODUCTION

Aux dires des experts du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le pourtour méditerranéen devrait être, au cours de ce siècle, « un hot spot du changement climatique ». L'augmentation des températures, la baisse des précipitations, l'occurrence des événements extrêmes, l'élévation du niveau marin sont estimées dans leurs grandes lignes par les Global Climate Models. Des programmes de recherche ont été lancés dans le but de modéliser à une échelle plus fine ces évolutions climatiques. Cependant, à ce jour, les effets combinés du changement climatique sur un territoire donné, et en particulier sur les systèmes spatiaux complexes que sont les villes, restent très mal connus car peu étudiés. Dès lors, les gestionnaires sont mal informés des impacts de ce changement sur le fonctionnement de leur ville, et les citoyens peu conscients de ses incidences sur leur mode de vie. Or, toute politique d'incitation à un comportement responsable des populations, d'adaptation ou encore de prévention des risques doit, pour espérer aboutir, reposer sur une compréhension minimale des interactions systémiques attendues entre l'évolution du climat local et l'anthroposystème urbain.

Cette communication propose des exemples de démarches modélisatrices destinées d'une part à appréhender les impacts des évolutions climatiques sur le fonctionnement de systèmes urbains, d'autre part à transmettre cette connaissance experte à différents publics. L'environnement de résolution de problèmes développé est ainsi composé d'un ensemble d'outils qui permettent d'appréhender la connaissance sous différents angles :

- l'angle de la complexité et de l'évolution du système dans le temps, appréhendé grâce à la modélisation systémique ;
- l'angle de la mise en œuvre d'un raisonnement pour proposer des mesures de gestion du territoire, abordé par le biais d'un système à base de connaissances ;
- l'angle de la visualisation spatiale de scénarios d'évolution du système urbain, traité grâce à la construction d'un générateur de maquettes virtuelles du territoire.

L'application portera sur la région urbaine de Nice, située sur le littoral méditerranéen du Sud de la France. Cette aire urbaine, la cinquième de France, présente l'intérêt d'être à la fois une grande région touristique et une métropole attractive en devenir, aux prises avec une artificialisation galopante. Si les décideurs sont désormais soucieux d'un développement territorial durable, ils ne sont pas en mesure de percevoir les enjeux du changement climatique sur l'économie et sur le fonctionnement de ce territoire.

II. LA CONNAISSANCE EN JEU

Longtemps controversés, le changement climatique et ses causes anthropiques semblent désormais avérés. Selon le 4^e rapport du GIEC (IPCC, 2007), les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) ne suffiront pas, du fait de l'inertie du système climatique, à éviter les dérèglements du climat. Complémentairement à ces mesures d'atténuation, des mesures d'adaptation des territoires doivent être mises en place pour anticiper les effets du changement climatique, réduire les vulnérabilités et tirer parti des opportunités que recèlent les spécificités territoriales. Si les politiques d'atténuation émanent de négociations interétatiques autour d'un bien public mondial (tel le protocole de Kyoto), les stratégies d'adaptation impliquent des interventions à un autre niveau, le niveau local et régional. Les collectivités locales ont donc un rôle majeur à jouer pour acclimater leur territoire. En France, les décisions prises aujourd'hui par les autorités politiques locales en matière de santé publique, de développement économique, de gestion de l'eau, de transport, de protection des espaces côtiers, par exemple, doivent anticiper les changements climatiques et leurs effets. Selon Paul Vergès, Sénateur et Président de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, la réussite de la politique de prévention et d'adaptation repose ainsi sur les élus locaux (ONERC, 2004).

1. Etat de la connaissance : Les outils d'aide à la réflexion et à la décision à la disposition des collectivités urbaines françaises.

Les collectivités territoriales qui cherchent à adapter leur territoire à la nouvelle donne climatique se trouvent face à l'absence de définition de politiques, ou plus simplement de lignes directrices. En effet, les incertitudes inhérentes au changement climatique sont encore très importantes, et leurs conséquences à tous les niveaux placent les actions humaines dans un contexte décisionnel très délicat (Association Nature Sciences Société Dialogues, 2008). Les responsables territoriaux attendent du chercheur une aide à la décision qui peine à émerger ; en effet, dans ce domaine, les retombées opérationnelles de la connaissance scientifique sont rares pour deux raisons majeures inter-reliées.

La première raison concerne l'évaluation des impacts territoriaux du changement climatique : celle-ci se heurte à des difficultés de natures différentes, qui rendent la connaissance scientifique imprécise et incertaine. La complexité du système climatique (phénomènes d'inertie, rétroactions) et la méconnaissance des anthroposystèmes (croissance démographique, développement socio-économique, évolution technologique, comportements des individus) sont à l'origine des incertitudes extrêmes affectant les prévisions du changement climatique et de ses effets à l'échelle globale. La communauté scientifique a développé, en réponse, une approche permettant de tenir compte de ces incertitudes (Byer, Yeomans, Lalani, 2001) : elle a élaboré des scénarios d'émissions de GES, images diverses du déroulement possible du futur (IPCC, 2000), et des projections climatiques associées, issues de modèles de la circulation générale de l'atmosphère (MCG). Cette approche s'est largement diffusée avec les travaux du GIEC. Cependant, l'évaluation des changements climatiques à un niveau régional est confrontée à des difficultés supplémentaires, faisant l'objet des recherches actuelles. En effet, les incertitudes sont au moins tout aussi importantes, si ce n'est plus, sur les caractéristiques régionales de l'évolution des précipitations ou des phénomènes extrêmes et la possibilité de surprises climatiques (Le

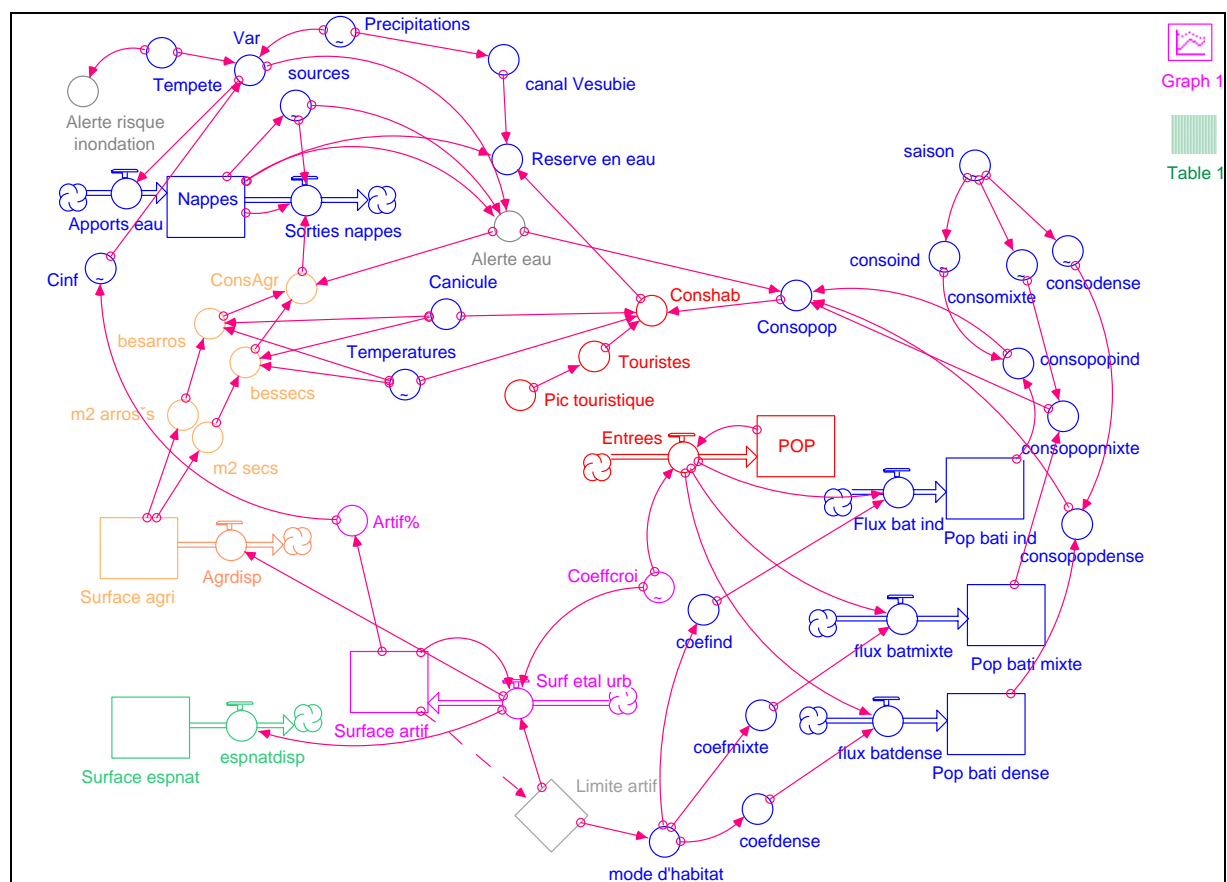
Treut, 2003). La descente en échelle d'un modèle de circulation générale vers un modèle de climat régional (MCR) représente un défi scientifique et technique. En outre, les incertitudes liées aux modèles régionaux sont moins bien cernées car ceux-ci sont plus récents et encore peu évalués par des simulations (Hallegatte, Somot, Nassopoulos, 2008). Les incertitudes sur les changements climatiques locaux, très importantes, se reportent sur les écosystèmes et les domaines impactés, qui sont fonction de ces évolutions. A ce jour, l'estimation des dommages locaux et de l'efficacité des mesures d'adaptation pour les prévenir est encore peu étudiée.

La seconde raison est la conséquence de la première : les chercheurs sont peu enclins à mettre à la disposition des décideurs et des gestionnaires cette connaissance imparfaite, qui plus est à des fins opérationnelles. Or, la demande de prévisions régionales précises qui émane des autorités politiques locales, se satisfait peu des incertitudes scientifiques. Cette incertitude a été l'un des principaux motifs évoqués pour retarder les mesures de réduction des GES, alors que l'application du principe de précaution est particulièrement adaptée à des impacts irréversibles en contexte incertain et lors de probabilité non nulle de phénomènes de seuil (Giraud, 2004). A l'heure actuelle, le savoir transmis de la communauté scientifique vers le monde des décideurs privilégie l'information sur le changement climatique, ses causes et ses enjeux. Il s'agit ainsi de sensibiliser les responsables des collectivités aux effets du changement climatique, les inciter à la réflexion par des questionnements ou des auto-évaluations afin qu'ils intègrent cette problématique dans leurs politiques. Dans des guides destinés aux collectivités territoriales (MIES, 2003 et 2007 et ONERC, 2004 et 2005), la mise en avant d'opportunités et la présentation de cas exemplaires renforcent une vision positive et active vis-à-vis des changements à venir. Les actions concrètes qui sont proposées concernent principalement les politiques d'atténuation des GES : le Plan Climat 2004-2012 incite les collectivités à mettre en place leur Plan Climat Territorial, visant à quantifier les émissions du territoire puis à définir un programme d'action pour les réduire. Dans ce cadre, la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre propose des ateliers réunissant les différents acteurs, fournit des préconisations et des contacts pour l'organisation et la réalisation des Plans Climat Territoriaux.

La phase actuelle semble ainsi correspondre à une première phase de mobilisation et de sensibilisation, axée sur l'atténuation des émissions de GES. Cependant, la question des impacts régionaux et les stratégies d'adaptation deviennent au fil des ans de plus en plus présentes (GIEC, 2007). Elles se déclinent désormais au niveau de l'Union européenne (présentation du Livre blanc d'adaptation aux changements climatiques de la commission européenne en avril 2009) et au niveau des états, avec par exemple en France l'élaboration en cours du plan national d'adaptation aux changements climatiques. Les réflexions sur l'adaptation aux effets territoriaux du changement climatique restent donc pour le moment générales. Les collectivités locales en général et les villes en particulier ne disposent pas encore d'outils d'aide à la réflexion et à la décision. Pour pallier ce manque, il est donc indispensable de développer une recherche dédiée à l'étude des impacts du changement climatique sur le fonctionnement des systèmes territoriaux à l'échelle régionale et locale. L'exemple développé concerne la région niçoise, dont le développement est depuis ses origines en lien fort avec son climat méditerranéen, puisque tourné vers le tourisme climatique hivernal, les pratiques balnéaires et plus récemment l'activité résidentielle touristique.

2. La modélisation systémique : pour une connaissance experte utile à la prospective des territoires urbains

La modélisation systémique est la méthode requise pour appréhender les différentes dimensions de la question. Elle permet en effet de faire interagir les changements climatiques avec les composantes environnementales et anthropiques des systèmes territoriaux et de déterminer les transformations sociodémographiques, économiques et spatiales qui en résultent. Le modèle présenté est destiné à mesurer les impacts des changements progressifs des paramètres physiques du climat local – température, précipitations, variabilité saisonnière et événements extrêmes - sur l'anthroposystème urbain, appréhendé au travers de 6 composantes majeures : les ressources en eau, la croissance de la population, la fréquentation touristique, l'occupation du sol, la consommation d'eau selon le type d'habitat et selon le type d'agriculture. Les simulations portent sur la période 2000-2050, avec le trimestre pour pas de temps. Le modèle est implémenté à partir du logiciel Stella (version 8) qui fonctionne selon une modélisation de type forrestérien, avec des stocks variant en fonction de flux d'entrées et de sorties, et des variables auxiliaires. Les interactions des variables sont représentées sous la forme d'un diagramme causal (Fig. 1.a) dont les relations sont traduites en équations (Fig. 1.b). Cette modélisation offre le précieux avantage d'accepter de la connaissance de type qualitatif, ainsi que des informations imprécises et lacunaires. A partir du tracé de courbes dont l'allure générale est connue, les données manquantes sont alors reconstituées.



a : Diagramme causal

```

Surface_agri(t) = Surface_agri(t - dt) + (- Agrdisp) * dt
INIT Surface_agri = { Place initial value here... }12047670
OUTFLOWS:
  Agrdisp = { Place right hand side of equation here... }Surf_etal_urb*.70
Surface_artif(t) = Surface_artif(t - dt) + (Surf_etal_urb) * dt
INIT Surface_artif = { Place initial value here... }68060000
INFLOWS:
  Surf_etal_urb = { Place right hand side of equation here... }IF Coeffcroi =0.00045 or
  Décision1 = 1 THEN 0 ELSE 0.0009*Surface_artif*(1-Surface_artif/110110000)
Surface_espnat(t) = Surface_espnat(t - dt) + (- espnatdisp) * dt
INIT Surface_espnat = { Place initial value here... }60860000
OUTFLOWS:
  espnatdisp = Surf_etal_urb*0.3
Alerte_eau = { Place right hand side of equation here... }If Var < sources + (Nappes*.33) then 1 else 0
Alerte_risque_inondation = { Place right hand side of equation here... }If Tempete then 1 else 0
Artif% = (Surface_artif/140970000)*100
besarros = if Temperatures >23 or Canicule then m2_arrosés*(300*1.4) else m2_arrosés*300
bessecs = if Temperatures > 23 or Canicule then m2_secs*(150*1.4) else m2_secs*150
canal_Vesubie = { Place right hand side of equation here... }((Precipitations*.30)*348000000)*.40
Canicule = (PULSE(4,1,(4*(MONTECARLO(20,500))))))
coefdense = { Place right hand side of equation here... }IF mode_d'habitat = 1 then .35 else .1
coefind = { Place right hand side of equation here... }If mode_d'habitat = 1 then .05 else .5
coefmixte = { Place right hand side of equation here... }If mode_d'habitat = 1 then .6 else .4

```

b : Exemple d'équations du modèle

Quarters	Apports eau	ConsAgr	Conshab	Réserve en eau
0	80+458+553+952.78	3+343+228+425.00	10+039+000+000.00	-1+655+160+000.00
1	90+198+352+787.20	4+674+158+247.78	17+587+311+040.00	51+344+274+487.78
2	44+934+142+800.99	3+334+141+487.31	9+888+003+823.34	119+510+177+098.85
3	82+877+655+719.87	3+329+599+440.34	8+158+632+081.14	124+887+967+825.49
4	87+188+115+804.33	3+325+058+383.33	10+074+945+529.97	160+521+871+702.25
5	69+146+633+280.02	4+648+725+618.94	17+647+607+725.13	179+858+534+580.81
6	98+130+628+779.88	3+315+979+185.31	9+917+480+172.54	191+513+692+115.38
7	44+114+048+090.23	3+311+441+047.35	8+181+541+081.53	216+811+428+785.94
8	45+093+722+343.44	3+306+903+885.48	10+108+923+289.39	181+408+658+244.70
9	48+099+292+371.53	3+302+387+701.15	13+619+854+159.67	158+753+688+312.74
10	68+390+217+335.45	3+297+832+495.98	9+949+004+904.79	151+595+740+538.05
11	49+993+099+815.58	3+293+298+271.39	8+204+283+428.04	163+633+591+999.99
12	99+200+598+411.85	3+288+785+028.97	10+142+165+094.74	158+082+891+898.83
13	69+138+835+654.83	3+284+232+770.22	13+663+259+629.28	193+283+739+290.57
14	98+119+584+880.88	3+279+701+496.64	9+979+084+712.29	199+120+738+728.42

c : Exemple de table de résultats

Figure 1: Présentation du modèle systémique « avec interventions »

L'aire urbaine étudiée renferme 360 000 habitants. Elle englobe la ville de Nice ainsi que 6 communes voisines appartenant à sa couronne périurbaine et rurale, et s'étend du littoral vers l'arrière-pays montagneux sur 14097 hectares dont 48% sont des terrains artificialisés, 43% des espaces naturels et 9% des zones agricoles, principalement situées le long de la vallée du fleuve Var. Le fonctionnement actuel du système territorial se caractérise par un ralentissement de la croissance démographique avec néanmoins une poursuite de l'étalement urbain due à la vitalité de l'économie résidentielle touristique. Il en résulte des conflits d'usage entre les activités, qui se soldent par une disparition progressive de l'agriculture. Ces tendances majeures constituent le socle du scénario tendanciel retenu pour les prochaines décennies. En inter-reliant les changements du climat local au fonctionnement tendanciel du territoire, le modèle appréhende

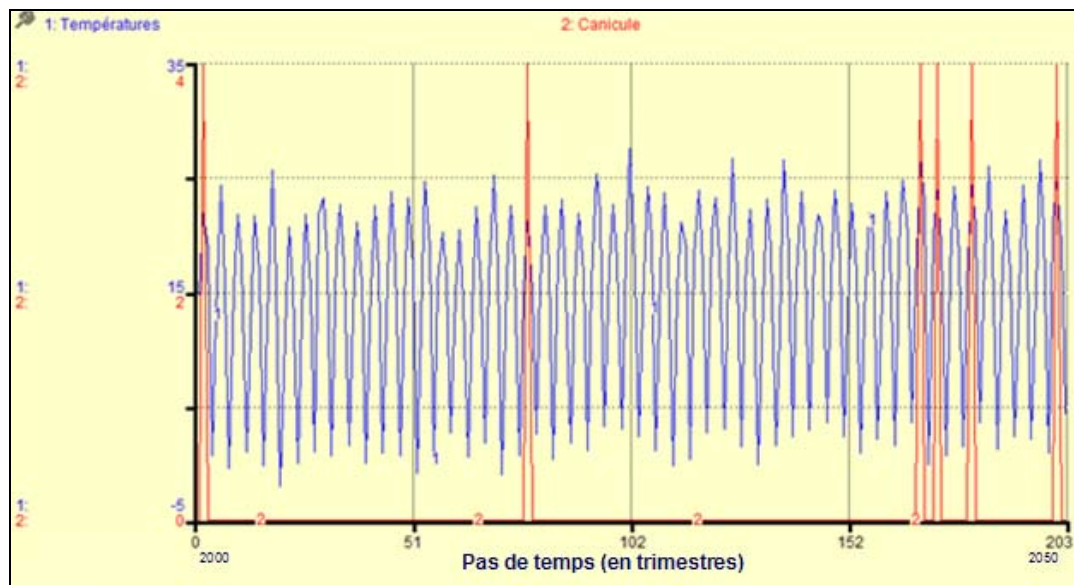
les transformations résultantes sur l'ensemble de l'anthroposystème, l'accélération ou l'infléchissement des tendances. Il permet aussi de focaliser l'attention sur certaines variables et d'en connaître précisément l'évolution. Dans ce modèle, l'attention sera portée sur la consommation d'eau qui varie en fonction du climat et des saisons mais également en fonction du niveau d'artificialisation, des besoins de l'agriculture périurbaine, de la consommation de la population permanente et touristique ainsi que du type d'habitat et du mode de vie qui lui est associé (habitats individuel, mixte, dense).

Les données relatives aux températures et à la pluviométrie locales sont tirées des données de l'ONERC. Elles ont été calculées par le modèle climatique Arpège de Météo-France à partir des hypothèses du scénario socio-économique A2 du GIEC. Une baisse des précipitations moyennes annuelles d'environ 75 mm et une hausse des températures (+ 2,6°C) sont prévues sur la période mais plus encore, une variabilité annuelle et saisonnière avec notamment un léger décalage des fortes précipitations du printemps vers l'été, ce qui ne devrait pas être sans conséquence sur le tourisme balnéaire. Les épisodes de canicule et de fortes précipitations dont la fréquence devrait augmenter ont été introduits dans le modèle selon des procédures aléatoires de type Monte-Carlo.

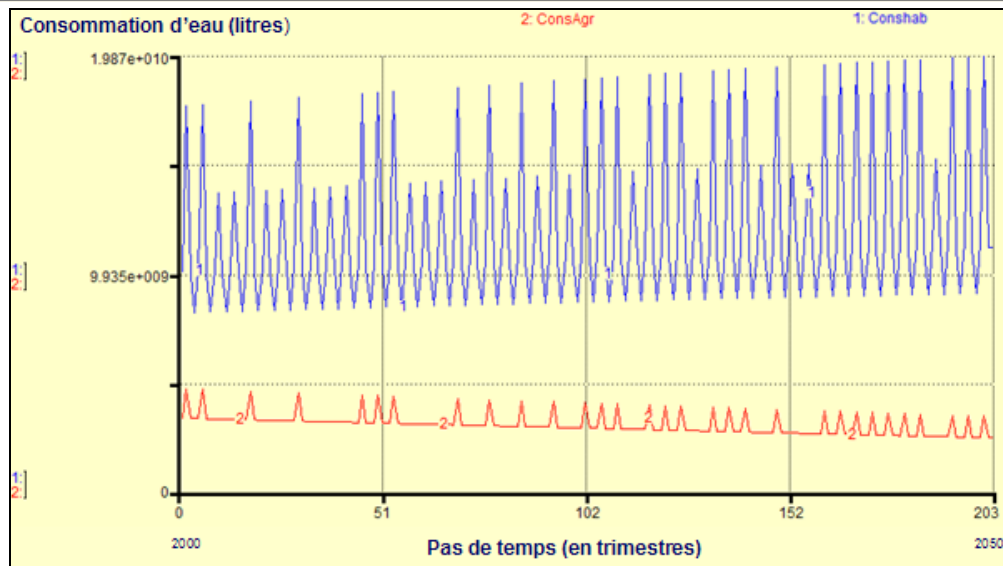
La modélisation se décompose en deux phases. La première correspond à la réalisation d'un premier modèle qualifié de « laisser-faire », dans lequel les tendances actuelles observées sur la croissance de la population, le rythme de l'étalement urbain, les types d'habitat et les consommations d'eau, se poursuivent jusqu'en 2050, tout en étant inter-reliées à l'évolution des paramètres climatiques. Ces derniers conditionnent les ressources en eau et la consommation agricole et domestique mais les quantités d'eau consommées dépendent également du type d'occupation du sol et des comportements des habitants perçus au travers du mode d'habitat. Les résultats de la simulation présentés figure 2 signalent une hausse de la consommation d'eau due à la combinaison de la hausse des températures estivales et de l'accroissement de la population. Les pics correspondent d'une part à des températures moyennes estivales dépassant 23°C et à des épisodes de canicule, d'autre part aux maxima de fréquentation touristique. La diminution des surfaces agricoles résultant de l'étalement urbain explique l'évolution à la baisse de la consommation agricole. Dans le détail, la consommation d'eau domestique reflète les différences de niveau de consommation d'eau liées au type d'habitat, ainsi en été la consommation moyenne en habitat de type individuel avec jardin et piscine est de 600l/h/j alors qu'elle est de 400l/h/j en habitat mixte et de 300l/h/j en habitat urbain dense. L'essentiel de la population vit dans les zones d'habitat mixte ce qui explique la part majeure de ce type d'habitat dans la consommation domestique. Comme 50% des gains trimestriels de population se portent vers l'habitat individuel périurbain, la progression de la consommation des populations vivant dans ce type d'habitat croît de manière rapide. En revanche, la population vivant dans le bâti dense reste stable et par voie de conséquence, la consommation associée l'est également. Ce fonctionnement au « fil de l'eau » porte à réflexion, non seulement l'artificialisation croissante et l'étalement urbain non maîtrisé sont désastreux pour la durabilité des territoires urbains mais encore la consommation d'eau s'envole. Par chance, la région niçoise est bien pourvue en eau grâce aux montagnes alpines qui l'entourent.



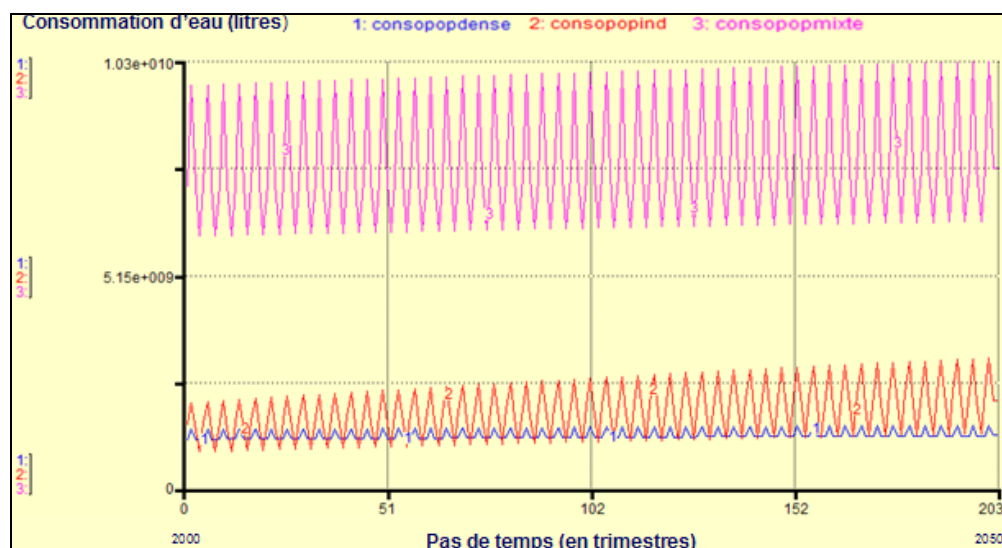
a : évolution des surfaces par type d'occupation du sol



b : variations des températures et entrée aléatoire d'épisodes de canicule



c : consommation d'eau agricole et domestique

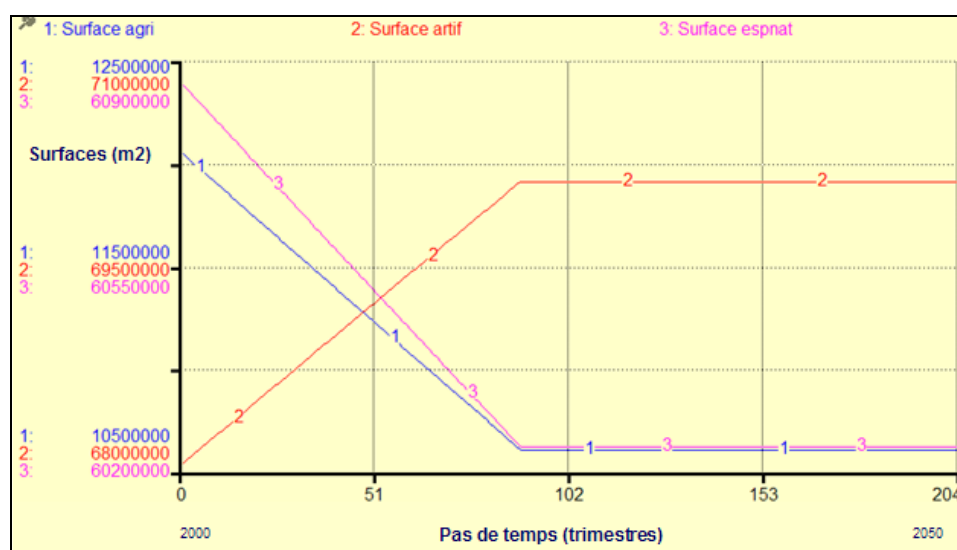


d : consommation d'eau par type d'habitat

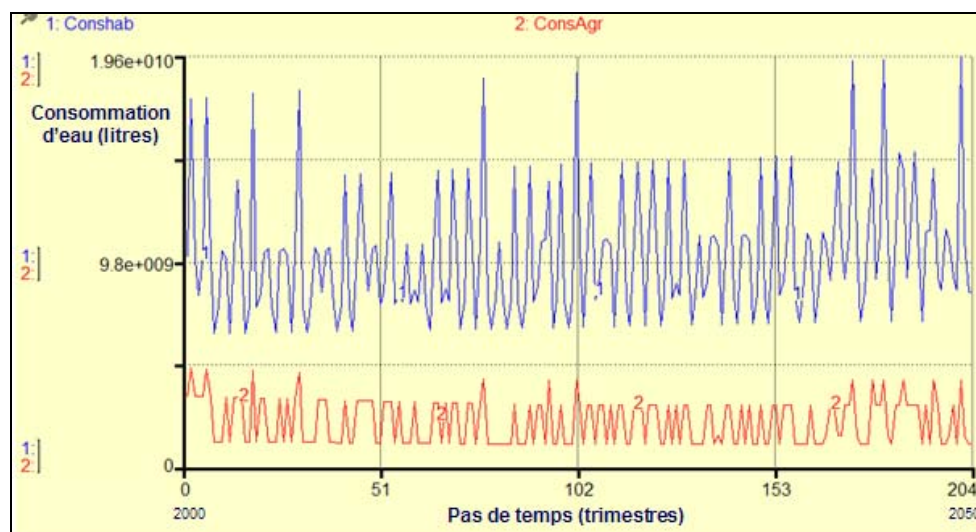
Figure 2: Résultats des simulations du modèle « laisser faire »

Le deuxième modèle dit « avec interventions » a pour objectif de tester les effets de différents types de mesures prises par les villes ou les collectivités locales. Des actions en faveur d'un développement urbain durable sont introduites. L'étalement urbain est interdit si un seuil d'artificialisation du territoire est atteint (50% dans l'exemple). Dans ce cas, l'habitat individuel est limité, et la densification du bâti existant préconisée ; les gains de population se distribuent alors différemment : 5% vers l'habitat individuel contre 50% initialement, 60% vers l'habitat mixte contre 40% et 35% vers l'habitat dense contre 10%. La deuxième série d'actions concerne des mesures prises en cas d'alertes « risque d'inondation » et « risque de pénurie d'eau ». Dans

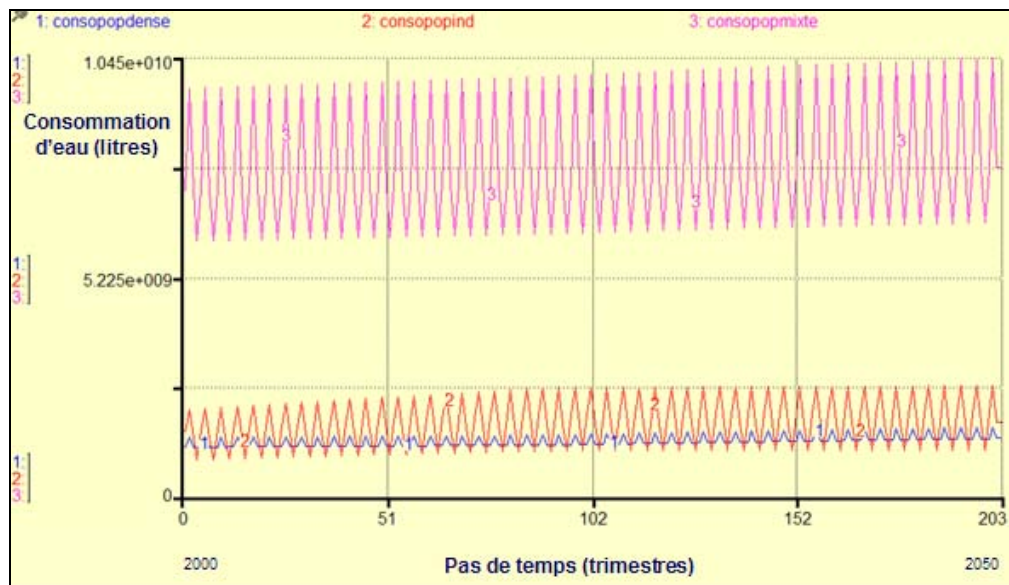
ce dernier cas, si les apports en eau dans les nappes souterraines sont inférieurs à la vidange naturelle des nappes, des restrictions de consommation sont imposées aux agriculteurs de même qu'aux citoyens, d'intensité différente en fonction du type d'agriculture et du type d'habitat. Les résultats des simulations reproduits sur la figure 3 sont à comparer à ceux de la figure 2. Les restrictions de consommation d'eau domestique en cas d'alerte « pénurie d'eau » portent leur fruit, excepté lors des épisodes de canicule où les restrictions ne sont pas appliquées. La consommation d'eau agricole est plus élevée en fin de période que dans le premier modèle en raison de la limitation de l'artificialisation. En revanche, les fluctuations engendrées par les restrictions d'eau sont importantes d'une saison à l'autre et, de toute évidence, préjudiciables à la production agricole. Si utiles soient-elles, les restrictions d'eau ont des effets limités dans le temps. Ces résultats montrent la nécessité de rechercher d'autres formes d'action, sur le temps long, pour réduire progressivement et durablement la consommation d'eau.



a : évolution des surfaces par type d'occupation du sol



b : consommation d'eau agricole et domestique



c : consommation d'eau par type d'habitat

Figure 3: Résultats des simulations du modèle « avec interventions »

Par les simulations effectuées à partir des modèles systémiques, il est alors possible d'anticiper, d'évaluer les effets des évolutions climatiques locales, de mesurer les résultats des actions spontanées, programmées ou simplement envisagées et ainsi, de progresser dans la compréhension des processus en jeu.

III. DES OUTILS POUR MIEUX APPREHENDER LA GESTION ET LES ENJEUX DU TERRITOIRE

La modélisation systémique est extrêmement utile à la recherche des impacts du changement climatique sur le système urbain et à l'anticipation des transformations territoriales à venir, mais son appréhension s'avère délicate pour des non spécialistes. C'est pourquoi, si l'on souhaite que la connaissance issue des simulations puisse être portée sur la scène des acteurs du territoire et notamment des décideurs, il est important de mettre en place des outils didactiques qui puissent non seulement répondre à leur besoin en information, mais aussi aider à la réflexion et à la prise de décision.

La mise en œuvre de deux outils complémentaires, dont le contenu s'appuie directement sur le modèle systémique présenté, est proposée ici (Figure 4) :

- un outil qui permet de présenter de façon explicite un ensemble de connaissances et de le mettre en action pour répondre à une question posée : le système à base de connaissances.
- un générateur de maquettes virtuelles du territoire. Ces dernières sont l'expression visuelle de ce que pourrait être le territoire à un certain horizon de temps si le scénario ciblé du changement climatique venait à se réaliser.

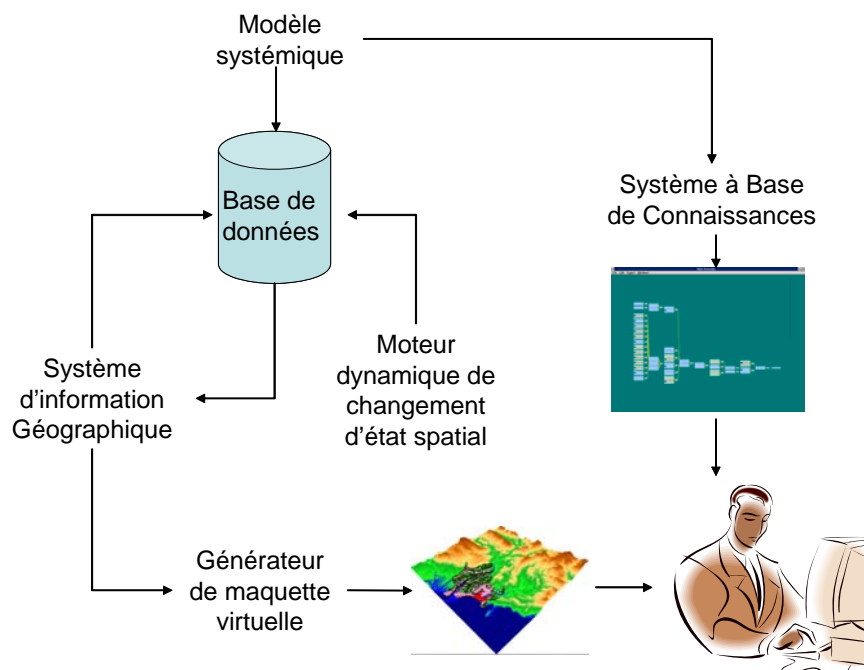


Figure 4: architecture générale de l'environnement de simulation

La philosophie et l'intérêt de ces deux approches sont présentés ici successivement, et illustrés à l'aide de premiers prototypes. Ces illustrations permettent d'apercevoir le « dessous » des modèles réalisés, appréhendés à travers leur phase d'élaboration, ainsi que le « dessus », constitué de la connaissance susceptible d'être livrée aux décideurs.

1. SereNicim, un premier prototype de système à base de connaissances

Issus de l'Intelligence Artificielle, les systèmes à base de connaissances (SBC) sont des applications informatiques ayant pour objet la simulation du raisonnement humain face à une situation donnée. Leur conception passe par une nécessaire acquisition, modélisation conceptuelle et formalisation des connaissances du domaine d'étude. Les prototypes développés permettent d'effectuer des simulations, offrant la possibilité d'obtenir rapidement des réponses à des questions posées, grâce à la mise en action d'un raisonnement systématique.

1.1. Objectif du système et modèle conceptuel général

Le SBC présenté ici est un tout premier prototype expérimental, qui a pour objectif de proposer aux décideurs des mesures de gestion territoriale pour pallier certains impacts négatifs des effets du réchauffement climatique en milieu urbain méditerranéen. S'appuyant sur le modèle systémique, cette version est pour le moment développée uniquement dans le domaine de la gestion de l'eau dans la région urbaine de Nice.

Inscrit dans la perspective du changement climatique, le modèle met en évidence un cheminement de pensée qui part d'une évolution potentielle des besoins en eau (besoins en eau

de la population et de l'agriculture) sous l'influence de paramètres climatiques, les compare à l'évolution de la ressource, ce qui permet de définir la potentialité d'un risque lié à l'eau (par exemple une pénurie ou une inondation doublée d'un coup de mer) pour aboutir à la proposition de mesures de gestion que pourraient prendre les décideurs pour minimiser l'ampleur de la vulnérabilité engendrée (Figure 5). A terme, il est prévu que ces mesures puissent être comparées selon leur coût social, économique et environnemental.

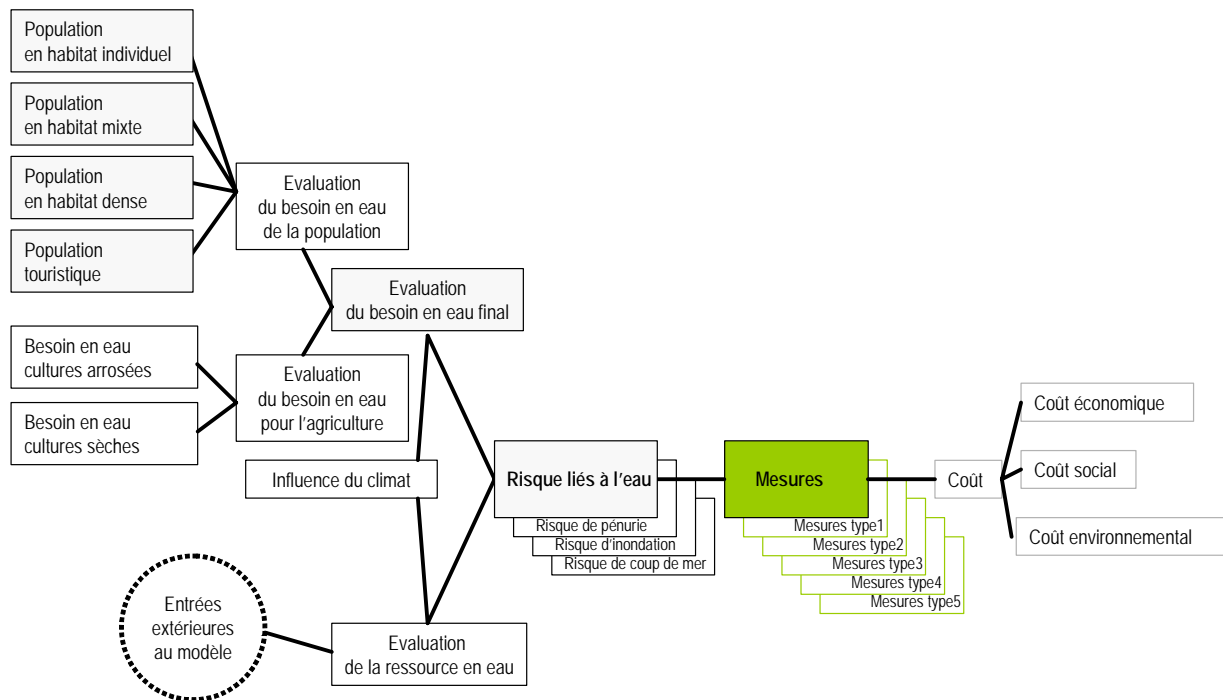


Figure 5: Modèle conceptuel : objectif du prototype SereNICim et étapes du raisonnement

1.2. Les « dessous » du modèle : phase d'élaboration.

La connaissance du domaine d'étude une fois cernée et acquise, le développement d'un SBC nécessite une modélisation qui utilise des formalismes propres à l'outil utilisé. Notre modèle est implémenté sous le générateur de systèmes experts Smart Elements, qui permet de structurer un corpus de connaissances grâce à deux grands types de formalisation : la formalisation par objets et la formalisation par règles de production.

1.2.1 Mise en évidence de la structure de la connaissance : la formalisation par objets

La formalisation par objets permet de représenter la structure de la connaissance. Les éléments en jeu vont être classés et caractérisés : ils sont ainsi hiérarchisés dans des classes (famille d'objets partageant les mêmes propriétés), sous-classes (classes qui sont des spécialisations de classe d'ordre supérieur), objets (unités élémentaires de description), sous-objets (objet composant d'un autre objet), et caractérisés par des propriétés qui peuvent être de différents types (booléen (B), entier (I), décimal (F), chaîne de caractères (S)...). Cette opération

intellectuelle va permettre une clarification de l'ensemble des éléments pris en compte dans l'expertise.

La connaissance intégrée dans SereNICim a ainsi été structurée en plusieurs grandes classes, comme par exemple :

- la classe *composantes de la gestion de l'eau* (Figure 6), regroupant les sous-classes *apports en eau*, *besoins en eau*, *réserve en eau* et *risque lié à l'eau*. La figure 6 présente le développement de la sous-classe des *besoins en eau*, avec comme propriétés la *quantité trimestrielle* et le fait d'être *déterminé*. Cette classe se subdivise en deux sous-classes : *besoins en eau agriculture* et *besoins en eau population*, qui elles-mêmes se subdivisent en sous-classes supplémentaires. Sur cette figure est aussi présenté, à titre d'exemple, le développement de la sous-classe *risques liés à l'eau*, qui se spécialise en 3 sous-classes : le *risque de pénurie en eau*, d'*inondation*, de *coup de mer*, contenant elles-mêmes des objets, et caractérisées par différentes propriétés.

- la classe *composantes politiques*, à laquelle est rattachée par exemple la sous-classe *actions des décideurs*, qui elle-même comprend la classe des *mesures*, subdivisée en plusieurs sous-classes et objets ;

- la classe des *activités consommatrices d'eau*, celle des *coûts*, des *composantes de l'environnement naturel*, des *éléments climatiques*, qui elles-mêmes rassemblent différents objets et sont caractérisées par diverses propriétés.

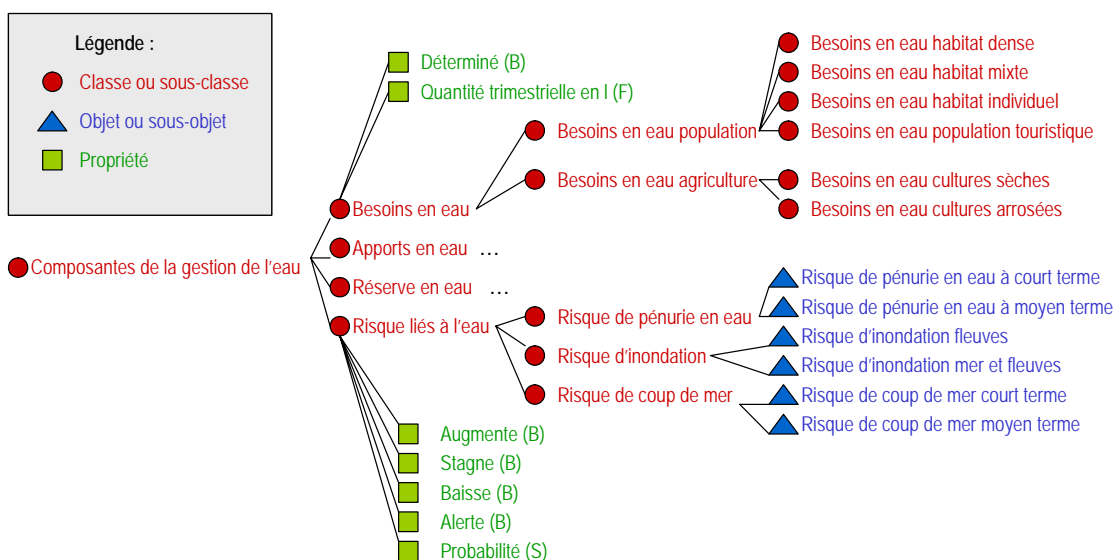


Figure 6: la classe « Composantes de la gestion de l'eau »

1.2.2 La formalisation du raisonnement : les règles de production.

On peut considérer un raisonnement comme étant composé d'un ensemble de règles de la forme « si condition(s) alors conclusion », qui s'enchaînent les unes aux autres. Dans Smart Element, les règles intègrent la formalisation par objets : la partie « conditions » de la règle permet de tester les valeurs des propriétés de classes et d'objets, et d'en déduire une conclusion débouchant si nécessaire sur l'affectation de valeurs à d'autres propriétés de classes ou d'objets.

A titre d'exemple, voici un extrait du raisonnement issu du modèle systémique et repris dans le SBC. Le raisonnement est dans un premier temps donné en langage naturel, puis traduit dans le formalisme propre à Smart Elements. Pour plus de lisibilité, nous avons choisi les mêmes couleurs que celles utilisées dans la sémiologie de la formalisation par objets, afin de bien montrer le principe de l'intégration des classes, objets et propriétés dans les règles de production.

Exemple :

Si la population réside en habitat individuel (de type californien) et que nous sommes en été, alors son besoin en eau saisonnier est de 600 litres/habitant/jour * 90 jours.

Transformée dans le langage du logiciel, cette règle devient :

```
Si > habitat_individuel_type_californien . population_résidente 0
et Yes saison2 . presence
Alors besoin_en_eau_pop_hab_individuel . determine
Assign [ 600*90* habitat_individuel_type_californien . population_résidente ]
à [ besoin_en_eau_pop_hab_individuel . quantite_trimestrielle_en_l ]
```

De cette façon là, toute la connaissance va être décortiquée et explicitée. Les grandes étapes du raisonnement présentées dans le premier modèle conceptuel sont détaillées dans des règles qui, au final, s'organisent en arbre de décision, visualisable dans un « Rule Network ». La figure 7 présente l'arborescence générale du raisonnement tenu, assortie d'un extrait plus détaillé sur une portion de raisonnement.

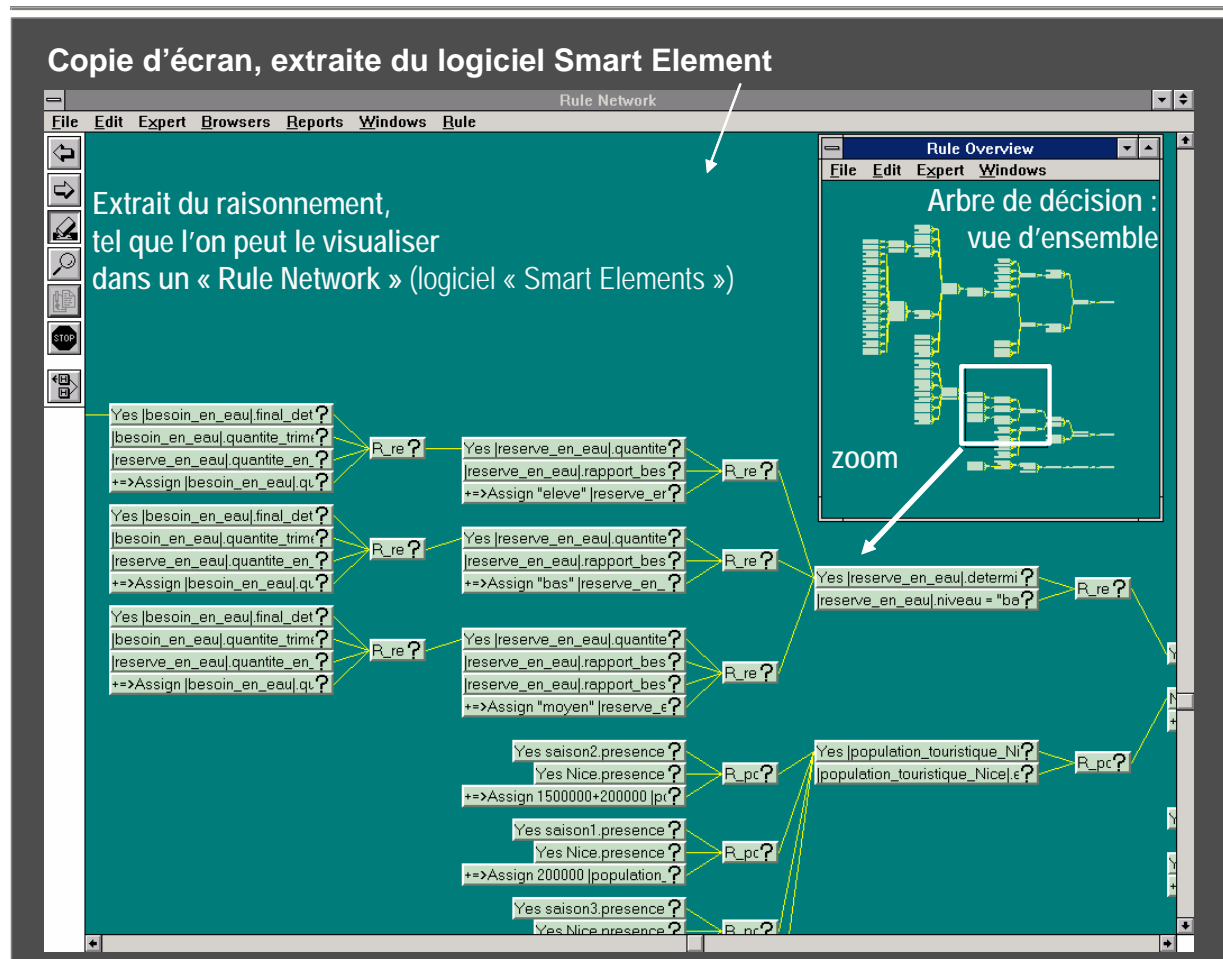


Figure 7: Rule Network : architecture du raisonnement formalisé dans SereNICim.

Ce détail de la formalisation de la connaissance, un peu ardu, peut ne pas être visible pour les décideurs. En revanche, le suivi des simulations, à travers la visualisation de l'arborescence des règles, leur ouvre des fenêtres sur les raisonnements tenus.

1.3 Le « dessus » du modèle : les simulations et le suivi des raisonnements tenus.

Les simulations sont faites grâce au moteur d'inférence. A partir d'une hypothèse à valider et/ou de données connues et saisies par l'utilisateur, des questions lui sont posées, et les réponses qu'il donne conduisent le système à cheminer progressivement dans les règles de production pour aboutir à une conclusion. L'un des intérêts de ces simulations est qu'elles peuvent être suivies pas à pas. Ainsi, l'utilisateur n'est pas forcément face à une boîte noire dans laquelle il entre des données et qui lui propose un résultat. Il peut, s'il le souhaite, suivre la progression du raisonnement dans l'arbre de décision, qui s'active au fil du questionnement et des réponses données, jusqu'au résultat final. Cela permet de savoir pourquoi telle ou telle solution est proposée, ce qui peut éclairer d'autant la décision.

Les simulations proposées dans SereNICim s'appuient sur la connaissance issue du modèle systémique et des résultats obtenus pour certaines des variables du modèle à certains pas de temps. Ce propos peut être illustré par l'exemple suivant : au pas de temps 121 (dans 30 ans), le modèle systémique projette une période estivale caniculaire, avec une réserve en eau inférieure aux besoins. Quelles mesures pourraient prendre les décideurs dans la perspective d'une telle situation ? Si l'on entre dans SereNICim l'ensemble des valeurs projetées à ce moment là (population par type d'habitat, surfaces agricoles par type d'utilisation, réserve en eau...), il calcule le besoin en eau total, le confronte à la ressource, et en déduit que ce sont les mesures de type 2, portant sur une réduction assez draconienne des consommations en eau, qui sont préconisées. La validation ou l'invalidation des conclusions intermédiaires s'inscrit dans l'arborescence des règles au fur et à mesure que le raisonnement se déroule. La figure 8 montre un rule network à la fin du raisonnement, et l'affichage de la conclusion retenue.

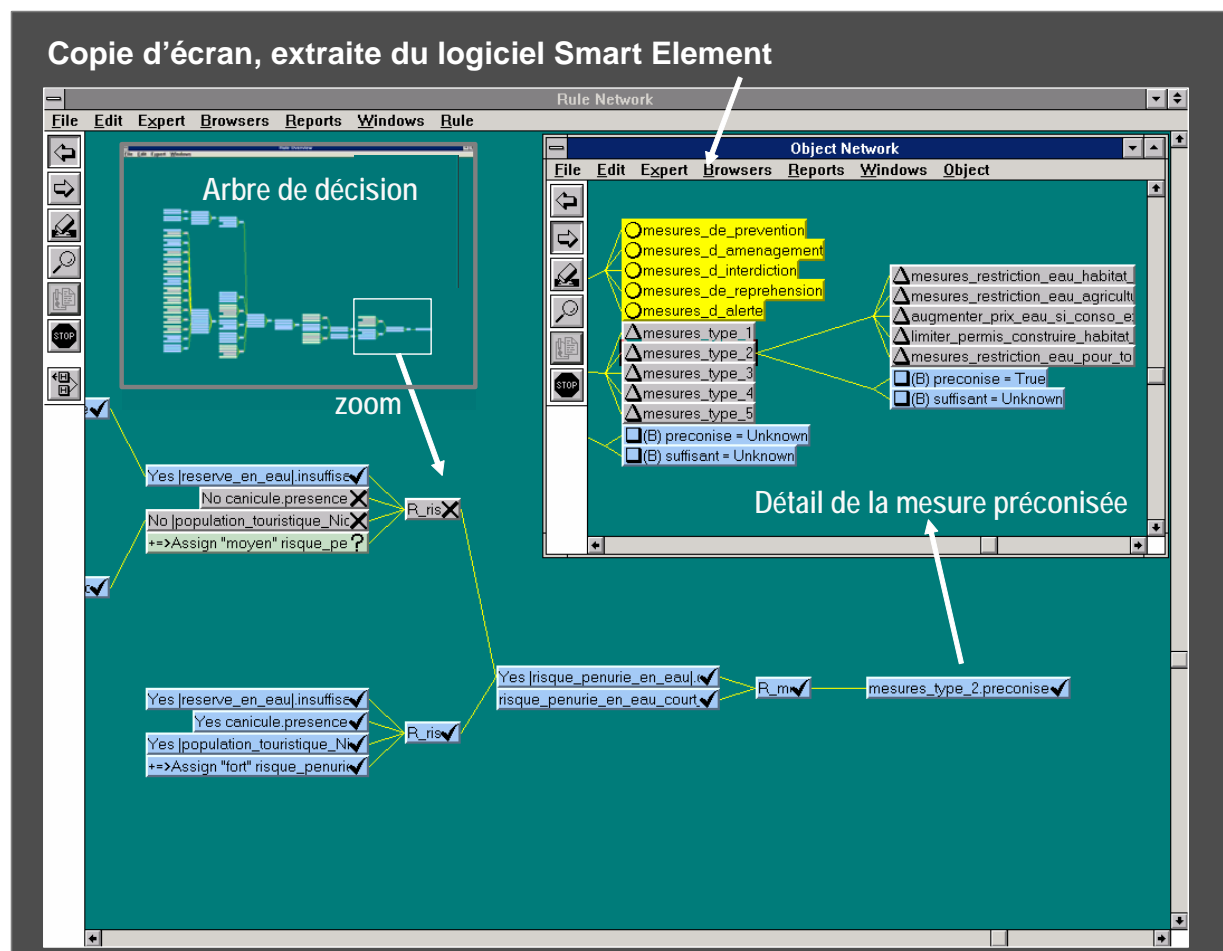


Figure 8: Visualisation générale d'une simulation sur le Rule Network

Les simulations peuvent ainsi être multipliées à l'envie. Fondés sur la mise en action d'un raisonnement systématique, les résultats obtenus sont comparables entre eux et permettent le cas échéant aux décideurs de visualiser un nombre conséquent de scénarios dans une transparence du cheminement intellectuel mené.

Mais pour avoir une visualisation spatiale de l'information, il convient d'utiliser un outil de simulation complémentaire. Un deuxième outil de soutien est ainsi proposé pour permettre aux collectivités urbaines de mieux comprendre leurs enjeux spécifiques : un générateur de maquettes virtuelles du territoire.

2. La génération de maquettes virtuelles du territoire, supports visuels en faveur de la géogouvernance

Les maquettes virtuelles du territoire permettent d'alimenter la réflexion du décideur par le biais de la simulation. Expression en 3D de ce que pourrait être le territoire à un certain horizon de temps, elles ont la capacité de traduire visuellement les résultats du modèle systémique pour les différents scénarios. Dès lors, les gestionnaires et décideurs peuvent appréhender les évolutions spatiales et temporelles de leur territoire, au cours de la période, d'une manière bien plus explicite et vivante que par le biais des graphiques de sorties du modèle systémique.

2.1 Les « dessous » du modèle : processus de simulation et gestion du changement spatial

Le processus de mise en action d'une simulation se déroule de façon séquentielle d'un point de vue logiciel. Ce processus est invisible pour l'utilisateur de l'environnement.

Dans un premier temps, le modèle systémique permet de traiter la dynamique temporelle des composantes territoriales. L'évolution des grandeurs quantitatives données par le modèle systémique engendre des situations spatiales qui doivent être représentées sur le terrain d'étude. Par exemple, lorsque des surfaces appartenant à un type d'occupation du sol disparaissent, d'autres types d'occupation prennent la place laissée vacante. Pour traduire ce processus, le résultat de la simulation issu du modèle systémique est envoyé dans une base de données pour les objets spatialisés. Cette information est analysée et intégrée au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) selon deux aspects. Le premier concerne l'évolution du type d'occupation du sol dans le temps et le second gère l'extrusion des objets sur la maquette virtuelle du territoire. L'idée est ici que l'évolution de la taille des objets au sein de plusieurs maquettes virtuelles générées à différents moments restitue l'évolution de la dynamique temporelle de ces objets dans le modèle systémique, tout en facilitant la prise de conscience des enjeux par les décideurs.

L'aspect spatial de l'évolution du territoire est géré au moyen d'un moteur de changement spatial. Ce moteur se caractérise par deux parties successives. La première correspond au calcul d'un pourcentage (en probabilité) de type d'occupation du sol ayant changé d'état à l'horizon de temps fixé par la simulation. La seconde partie du moteur s'appuie sur un générateur de nombre aléatoire pour sélectionner des polygones de la base de données SIG et leur affecter une valeur de changement d'état. Ce changement d'état est calculé par le biais d'une matrice construite pour décrire tous les changements d'états possibles et la probabilité de leur réalisation. Six états possibles, donnés par les types d'occupation du sol issus de la base Corine Land Cover et pris en compte dans le modèle systémique, ont ainsi été déterminés sur le territoire d'étude : le bâti dense, le bâti mixte, le bâti individuel, l'espace des cultures sèches, celui des cultures arrosées, et enfin l'espace naturel.

Il suffit ensuite de produire une requête de sélection dans le SIG pour faire migrer les objets concernés d'un type d'occupation du sol (le type « départ ») à un autre (le type « arrivée »). Par

exemple, 64% des surfaces « bâti individuel » restent dans cet état, 6% deviennent du « bâti dense » et 3% du « bâti mixte » à T+50 ans. La question de l'affectation spatiale des proportions données par la matrice de changement d'état est cependant très complexe car elle correspond à un problème multidimensionnel et combinatoire. La solution opérationnelle choisie consiste à s'appuyer sur les méthodes de type Monte-Carlo, et sur le générateur de nombre aléatoire fourni par le logiciel SPSS.

Les échantillons obtenus sont ensuite envoyés dans la base de données du SIG au sein de laquelle les changements d'état sont gérés par un processus de migration, dont la conséquence finale est une redistribution des occupations du sol pour la somme des polygones composant notre terrain d'étude (Fig. 9).

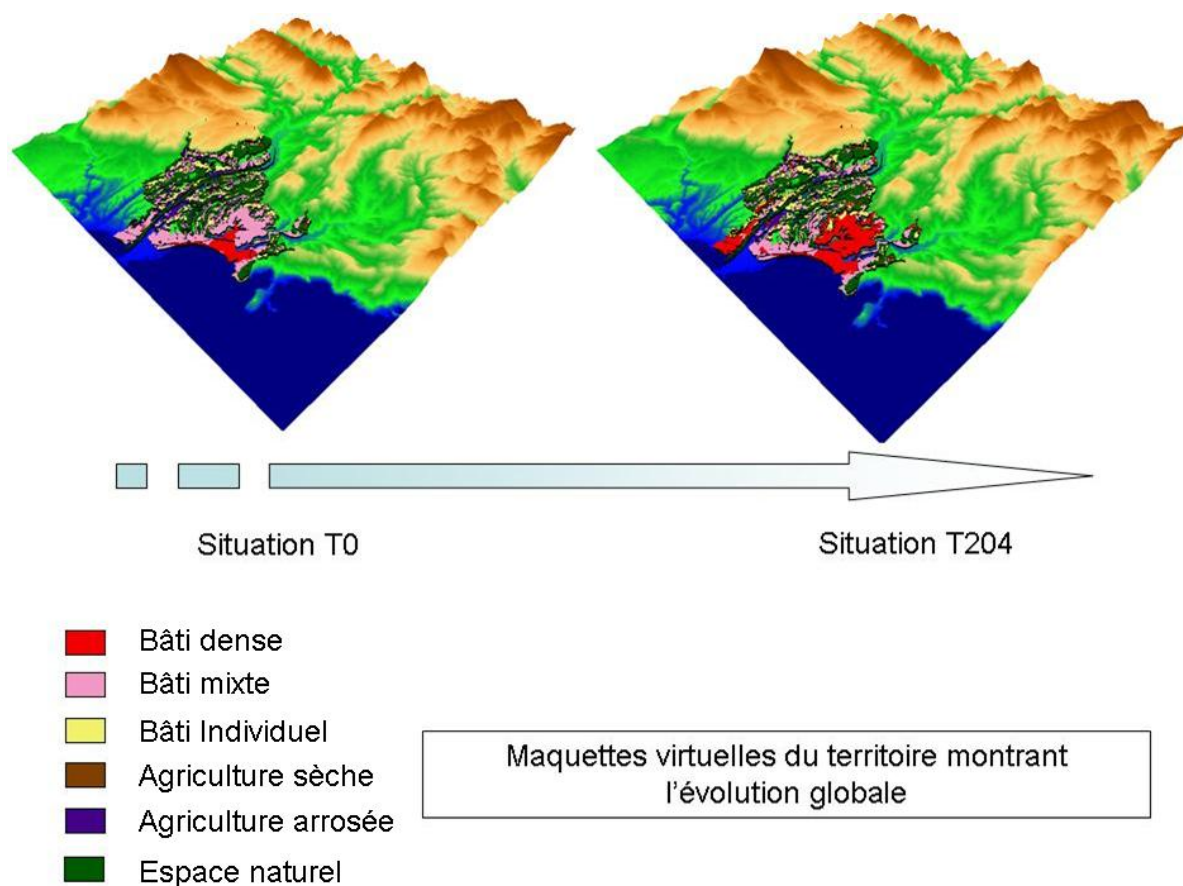


Figure 9: Visualisation de deux maquettes virtuelles du territoire pour la situation initiale (T0) et pour la situation finale (T204)

2.2 Production et objectifs de la maquette virtuelle du territoire

La maquette virtuelle du territoire est générée à partir de la base de données spatialisée du SIG. Par effet cascade, les modifications engendrées en amont au sein de l'environnement de simulation sont répercutées sur les objets spatiaux contenus dans le SIG et, par là même, intégrés

dans la maquette. Cette liaison avec un SIG permet également de cibler des types d'occupation du sol précis et de suivre leur évolution (Fig. 10).

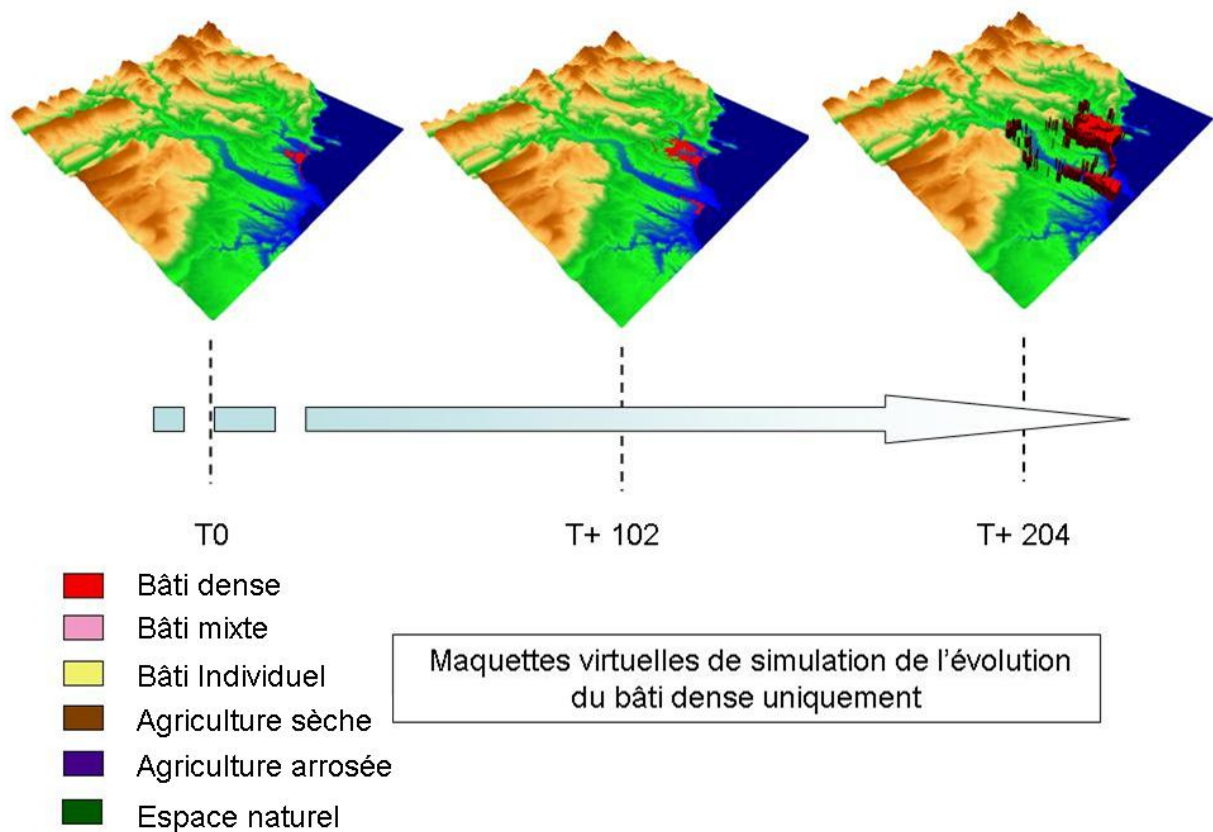


Figure 10: Visualisation de trois maquettes virtuelles du territoire montrant l'évolution du type d'occupation du sol « bâti dense » dans la simulation

Cette simulation, axée sur la visualisation de l'occupation du sol « bâti dense », montre globalement une tendance à la densification de l'espace urbain suivant un gradient d'éloignement du front de mer. L'enveloppe du territoire se recompose par un processus de réaffectation de type d'occupation du sol, principalement au détriment de l'agriculture sèche et du milieu naturel.

2.3 Maquettes virtuelles et géogouvernance

Dès que l'on cherche à aménager un territoire, le fait spatial émerge et chacun des acteurs de ce territoire attend de manière plus ou moins explicite une panoplie de cartes destinées à présenter un futur prévu pour le territoire en projet. Les nouveaux vecteurs d'informations que sont les maquettes virtuelles du territoire offrent un moyen formidable pour aider les décideurs à aborder deux aspects de la complexité : d'une part le caractère dynamique du territoire dans le temps, et

d'autre part la capacité à changer d'échelle de perception (Fig. 11). Ce faisant, ils élargissent les classes de problèmes soulevés et en perçoivent les interactions.

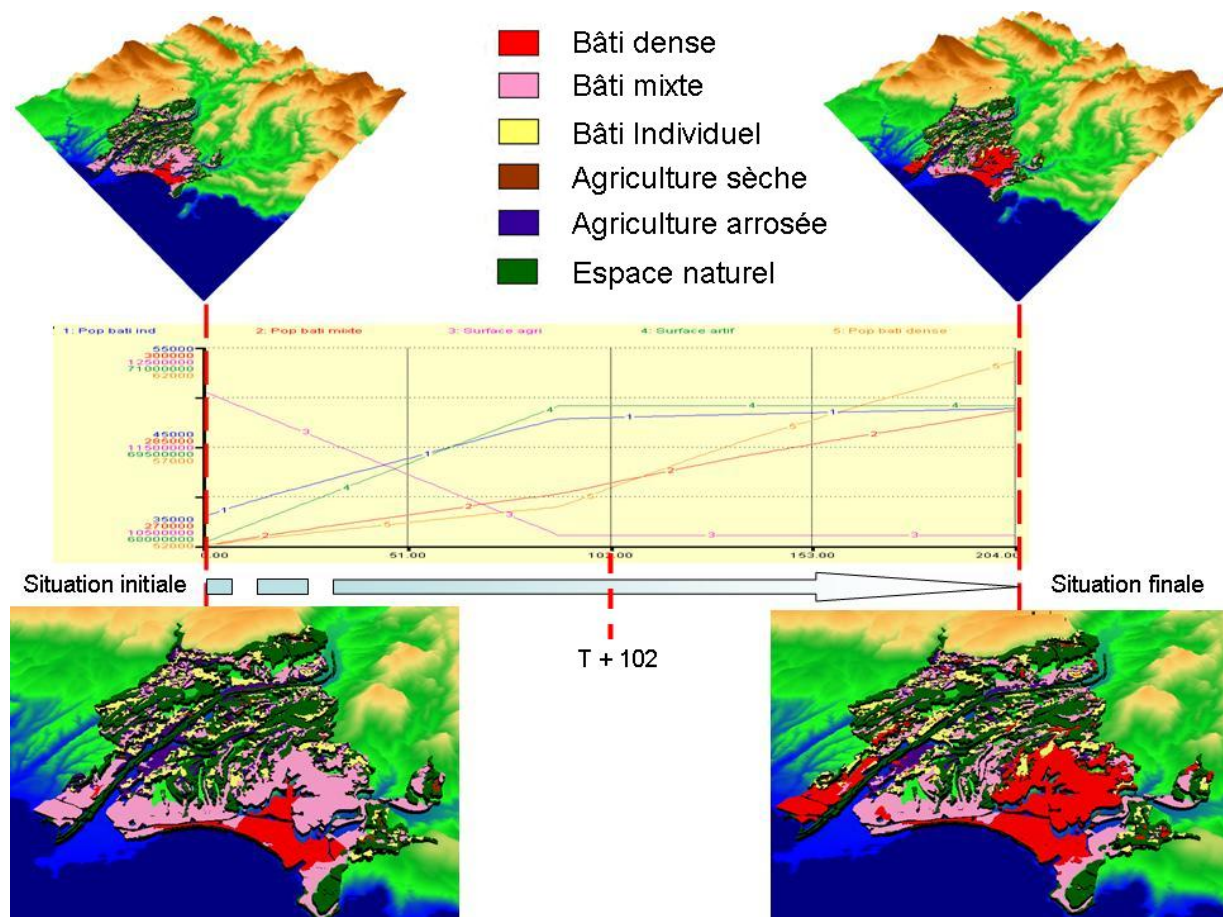


Figure 11: Exemple de mise en action de maquettes virtuelle sur le terrain d'étude

L'étude de la figure 11 montre la grande capacité d'aide à la compréhension des enjeux sur le territoire. Les quatre maquettes traduisent visuellement le graphe central donné par le modèle systémique à deux échelles spatiales et temporelles différentes. Elles permettent, pour les deux dates, T0 et T+50 ans, de mieux se figurer quelle pourrait être l'allure du territoire si la situation modélisée dans le graphe se réalisait.

On mesure facilement le pouvoir heuristique de ce mode de représentation du phénomène particulièrement quand il est conjugué à un modèle systémique. Il offre au décideur un moyen de mettre à jour et/ou réviser ses croyances sur son territoire dans un espace spatio-temporel interactif, au sein duquel il peut simuler à volonté des situations possibles et complexes.

Enfin, la production de ces maquettes virtuelles s'appuie sur la description de la scène complète dans un langage permettant de créer des fichiers légers qui peuvent être visualisés sur un navigateur internet. La maquette virtuelle du territoire peut donc être envoyée par ce biais à des

décideurs lointains, tout en offrant la possibilité d'une navigation en temps réel. Elle peut ainsi constituer un outil opérationnel d'aide à la géogouvernance.

IV. CONCLUSION

Adapter les territoires aux changements climatiques exige de recourir à la modélisation pour comprendre les incidences de ces changements sur le fonctionnement global du système territorial urbain et les impacts fonctionnels et spatiaux qui en découlent. L'enjeu est double : d'une part intégrer et inter-relier les différentes dimensions des systèmes territoriaux dans une approche transversale, d'autre part répondre aux attentes des décideurs et gestionnaires en leur apportant de la connaissance sur les devenir possibles des territoires, utile à l'anticipation des politiques d'aménagement. Or, modéliser les interactions climat-nature-territoire à une grande échelle, dans une optique géoprospective et opérationnelle, est une tâche fort délicate. Les outils réalisés dans ce sens sont rares ou restent très souvent du ressort de l'expert, ce qui les rend peu accessibles aux non initiés. La démarche exposée entend concilier recherche appliquée et aide à la décision. Elle se trouve encore dans une phase exploratoire. Les prototypes réalisés, s'ils doivent être enrichis et validés, permettent cependant de mettre en évidence l'intérêt que peut avoir le développement d'une plate-forme de simulation rassemblant la connaissance géographique dans toute sa complexité et ses dimensions temporelles et spatiales. Ainsi, le développement de cet environnement de simulation interpelle à plusieurs niveaux.

D'un point de vue de la construction de la connaissance, les modélisations successives mettent en évidence les points stables, robustes, du domaine d'étude, mais aussi les limites. Dans une perspective heuristique, l'élaboration des modèles nécessaires au développement de cet environnement de simulation est un excellent moyen de se poser des questions sur la connaissance, de l'explicitier, de l'enrichir. Ainsi, après avoir été une aide précieuse à la clarification de l'expertise, le balancement entre savoir et organisation du savoir par enrichissement réciproque est une méthode efficace de progression dans le travail scientifique. D'un point de vue opérationnel, la possibilité offerte aux décideurs de suivre pas à pas un raisonnement qui aboutit à la préconisation de mesures de gestion du territoire adaptées à l'état de leur contexte socio-environnemental sous contrainte du changement climatique, ainsi que la mise en évidence des répercussions spatiales de leurs décisions, sont autant de facteurs susceptibles d'alimenter leur réflexion face à une prise de décision. Qui plus est, les outils proposés mettent à disposition de tous les acteurs du territoire, décideurs et gestionnaires comme grand public, une connaissance mobilisable dans le cadre de démarches participatives.

V. BIBLIOGRAPHY

Association Nature Sciences Société Dialogues (2008) Synopsis, Journées NSS 2008, *Changements climatiques : l'adaptation à l'ordre du jour*, 7 et 8 octobre 2008, Paris.

Byer, P.H., Yeomans, J.S., Lalani, M. (2001) *Addressing Climate Change Uncertainties In Project Environmental Assessments*, Research and Development Monograph Series, Research supported by the Canadian Environmental Assessment Agency, <http://www.acee-ceaa.gc.ca/015/001/025/index_e.htm> (April 10, 2009).

Chardonnel S., Feyt G., Loubier J.-C., (2003) "Maquette Virtuelle et projet de territoire : vers une vision commune" in Lardon S., Debarbieux B., editors. *Les figures du projet territorial*. Edition de l'Aube, Paris. p 147-170.

Dubus, N., Chamussy, H. (2003) "Géographie et outils d'aide à la décision pour l'aménagement socio-environnemental" Actes du Colloque International *Environnement et Aménagement : Réflexions et Méthodes*, Géosphères, Annales de Géographie de l'Université Saint-Joseph de Beyrouth, vol.21-22, p 19-40, 14-15 décembre 2000, Beyrouth.

Giraud, P.-N. (2004) "La lutte contre le changement climatique", in *Etudes* 2004/4, Tome 401, Paris, p 321-332.

Guigo, M., Davoine, P.-A., Dubus, N., Guarniéri, F., (1995) *Gestion de l'environnement et système expert*, Masson, Paris.

Hallegatte, S., Somot, S., Nassopoulos, H. (2008) *Anticiper le changement climatique autour de la Méditerranée*, collection IPEMED "Notes & Documents", Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen, Paris.

IPCC (2000) *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Nakicenovic, N., Swart, R., editors. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge.

IPCC Core Writing Team (2007) *Climate Change 2007: the AR4 Synthesis Report*, Pachauri, R.K., Resinger, A., editors. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

Le Treut, H. (2003) "Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes", in Académie des Sciences, *Effet de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité ? Comptes Rendus Géosciences*, vol. 335, Paris, p 525-533.

Loubier, J.-C. (2004) *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité (Savoie et Haute-Savoie)*, Thèse de Géographie, Université J. Fourier - Grenoble I, <http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/69/90/index_fr.html> (April 10, 2009).

Loubier J.-C. (2006) "Construction interactive de maquettes numériques du territoire" in *Revue internationale de Géomatique*, Numéro spécial 3D, volume 16, n°1/2006, p 93-113.

Loubier J.-C. (2007) "Simulation des effets du changement climatique sur les domaines skiables de Savoie et Haute Savoie" <<http://mappemonde.mgm.fr/num13/articles/art07103.html>> (April 10, 2009), Mappemonde n°85.

MIES (2003) *Prévenir le changement climatique, Mémento des décideurs : Les collectivités territoriales engagées dans la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre*, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Paris.

MIES (2007) *Plans climat territoriaux : des territoires en action. 1er recueil d'expériences 2007, 21 collectivités engagées dans la relève du défi climatique*, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Paris.

ONERC (2004) *Collectivités locales et changement climatique - Etes-vous prêts ? Un guide pour l'adaptation à l'attention des collectivités locales*, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Paris.

ONERC (2005) *Collectivités locales et changements climatiques : quelles stratégies d'adaptation ?* Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Paris.

Voiron-Canicio, C. (2005) "Anticiper à l'aide d'un SIG, les conséquences de la paralysie urbaine en temps de catastrophe : application à la ville de Nice" in *Systèmes d'Information géographique et gestion des risques*, Paris, ISTED, p 55-58.

Voiron-Canicio, C., Chéry J-P. (2005) "Espace géographique, spatialisation et modélisation en dynamique des Systèmes", Actes du 6^{ème} Congrès Européen de Science des Systèmes, 19-22 septembre 2005, Paris.

Voiron-Canicio, C. (2007) "Recourir aux modélisations systémiques" in *La ville durable, perspectives françaises et européennes*, sous la direction de Offner J-M. et Pourchez C., Problèmes Economiques et Sociaux, dossier n°993, p 73-77.

Voiron-Canicio, C. (2009) "Predicting the Urban Spread Using Spatio-Morphological Models" in Murgante, B., Borruo G., Lapucci A., Editors, *Geocomputation and urban planning*, Springer, Studies in Computational Intelligence 176, p 223-236.